

伊勢湾内のアマモ場における炭素固定量の検討

国分 秀樹¹・山田 浩且²

¹正会員 三重県水産研究所 鈴鹿水産研究室 (〒510-0243 三重県鈴鹿市白子1-6277-4)

E-mail:kokubh00@pref.mie.jp

²非会員 三重県水産研究所 企画・資源利用研究課 (〒517-0404 志摩市浜島町浜島3564-3)

E-mail:yamadh03@pref.mie.jp

ブルーカーボンと呼ばれる海洋生態系によって固定される炭素のうち、沿岸域における炭素固定は、主にマングローブや塩性湿地、干潟や藻場によって行われている。本研究では、伊勢湾内の造成アマモ場と天然アマモ場において、炭素固定量の定量的な評価を実施した。年間の現存量の変化より、アマモ草体の生産量と枯死量を、明暗条件のチャンバーを用いた現場実験により、アマモの呼吸量と光合成量を算出した。その結果、生産量（光合成量）と枯死量、呼吸量の総和から年間のアマモの炭素固定量を推定すると、造成と天然アマモ場でそれぞれ、 $225\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、 $180\text{g-C/m}^2/\text{year}$ と推算でき、安定的な天然アマモ場と比較して生産量の高い造成アマモ場のほうが炭素固定量が高くなった。両海域アマモ場全域における炭素収支は造成アマモ場（2ha）で 4.5t-C/year 、天然アマモ場（100ha）で 180t-C/year の炭素をブルーカーボンとして固定していることが分かった。

Key Words : Carbon storage, *Zostera marina*, Ise Bay, Photosynthesis, Respiration

1. はじめに

国連環境計画（UNEP）に提唱され国際的に注目されているブルーカーボンとは海洋生態系の生物活動によって固定（隔離・貯留）される炭素の総称である¹⁾。その量は地球全体の光合成活動によって固定される炭素の55%に相当すると見積もられている¹⁾。我が国は島嶼国で海岸線延長は約3万5,000km、国土面積当たりの海岸線延長は世界6位と先進国では最大級であり²⁾、世界的に主要なブルーカーボン貯蔵国と評価されれば、沿岸生態系から大きな恩恵を受けていることになる。そのため我が国の沿岸に分布する生物の炭素固定がブルーカーボンに相当するのかが検証すべき重要な課題である。この

ブルーカーボンという概念は近年提唱されたばかりであり、研究が進んでいない分野である。また浅海域で生物生産の高い藻場や干潟では、従来から窒素循環に関する研究が中心で、生物の炭素固定機能に着目した知見は少ない。ブルーカーボンとしての評価を行うことで沿岸浅海域に対する社会的・経済的価値の向上が見込まれ、陸域と同様のカーボンオフセット制度の導入など、沿岸浅海域における生物多様性保全や自然再生の促進にも寄与できるものと考えられる。本研究では、伊勢湾御殿場海域に造成されたアマモ場と松名瀬海域の天然アマモ場において、アマモ草体の炭素固定量とその貨幣価値を推定した。

2. 研究方法

(1) 調査海域の概要

調査対象とした伊勢湾のアマモ場を図-1に示した。津市御殿場海域は三重県により造成されたアマモ場である。造成後3年以上経過し、造成時は約 700m^2 であったが造成後安定的に繁茂し、現在では約 $20,000\text{m}^2$ まで拡大している。一方松阪市松名瀬海域は、海岸線に沿って約100haに広がっている伊勢湾内で最大級の天然のアマモ場である。以上の2箇所のアマモ場を調査対象とした。

(2) アマモ現存量の調査

図-1に示した2箇所のアマモ場において、0.5m四方の

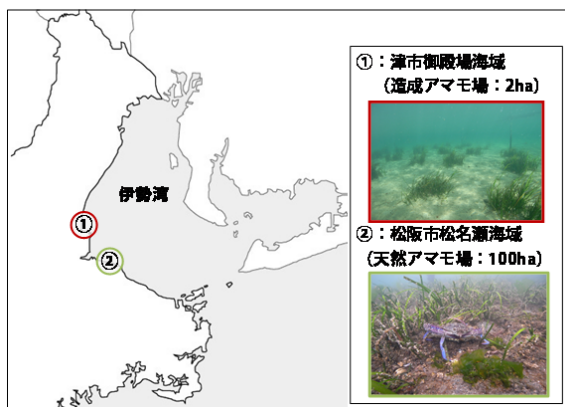


図-1 調査海域の概要

方形枠内の地上部と地下部を潜水作業により全て採取した (n=3) . 採取後, アマモ草体を栄養株, 生殖株, 種子, 地下茎に分離し, 60°Cで48時間乾燥後, それぞれの重量を計測した. 乾燥後の試料はミルを用いて粉碎し, 希塩酸溶液 (1N) により付着物等の炭酸カルシウム分を除去した後, CNコーダー (elementar社製Vario Max) を用いて, それぞれの炭素含有量を計測した. 試料採取は, 2014年7月から2015年5月まで隔月で定期的に行なった.

(3) アマモの光合成量と呼吸量の調査

図-1に示した御殿場のアマモ場において, 光合成による炭素固定量調査を実施した. アクリル製の明条件チャンバーと塩化ビニル製の暗条件チャンバーをアマモ場と裸地海底にそれぞれ設置し, 水中モーターを用いて攪拌をしながら90分を1サイクルとして連続的に溶存酸素濃度の変化を観測した (図-2) . 1サイクルの観測終了後,

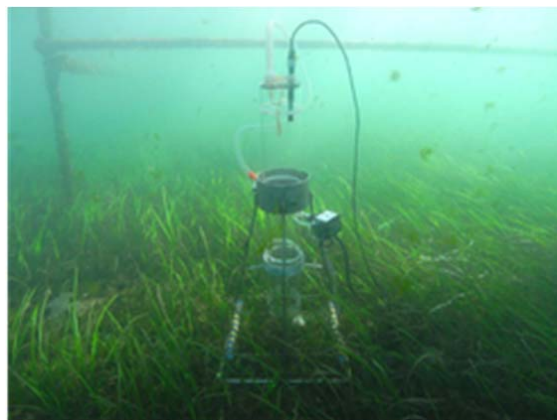


図-2 アマモ場に設置したチャンバー



図-3 アマモの炭素収支の概念図

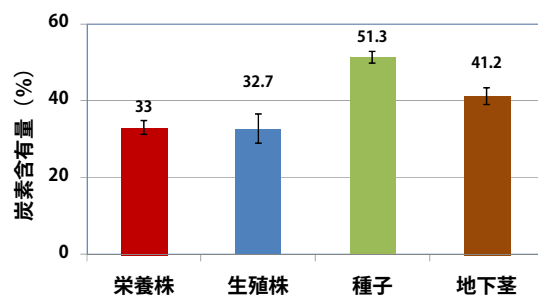


図-4 アマモ草体各部位の炭素含有量 (年平均値)

チャンバーを開放状態にし, 内部の溶存酸素量が周囲の海水と同等に回復したことを確認した後, 次の観測サイクルを開始した. チャンバーには平均3株程度のアマモ草体が入るように設置した. 設置の際には, 葉状動物や付着珪藻の影響を排除するため, 潜水作業により草体を掃除した後, 計測を開始した. また並行して, 現場海水を明暗条件の孵卵瓶に入れ, チャンバー付近に設置し, 溶存酸素濃度の変化を計測した. アマモの光合成量は, アマモチャンバー内の溶存酸素変化から海底堆積物および水中の植物プランクトンによる光合成と呼吸による酸素消費を差し引くことで, 下記の式よりアマモの酸素消費速度と酸素生成速度を算出した.

$$C = (DO_{DC} - DO_{DB} - DO_{DW}) \cdot V/S/t \quad (1)$$

$$P = \{(DO_{LC} - DO_{LB} - DO_{LW}) - (DO_{DC} - DO_{DB} - DO_{DW})\} \cdot V/S/t \quad (2)$$

ここでCはアマモの呼吸速度, Pはアマモの純生産速度, DO_{LC} は明条件のアマモチャンバー内の溶存酸素変化量, DO_{LB} は明条件ベンシックチャンバー内の溶存酸素変化量, DO_{LW} は明瓶内の溶存酸素変化量, DO_{DC} は暗条件のアマモチャンバー内の溶存酸素変化量, DO_{DB} は暗条件のベンシックチャンバー内の溶存酸素変化量, DO_{LW} は明瓶内の溶存酸素変化量, DO_{DW} は暗瓶内の溶存酸素変化量, Vはチャンバーの容積, Sはチャンバーの底面積, tは1サイクルの観測時間を示す. さらに上式で算出された呼吸速度と純生産速度から, アマモの二酸化炭素排出量と酸素消費量の比 (呼吸商) を1と仮定し, 炭素量固定量と炭素放出量を推定した. 光合成量の調査は, 現存量調査と同様に, 2014年7月から2015年5月まで隔月で定期的に行なった.

(4) アマモの炭素固定量の推定

アマモは, 光合成により草体生産を行うことにより海中から炭素を固定する一方, 呼吸と枯死分解により海中へ二酸化炭素を放出すると考えられる. 本研究では, 枯死分解後は全て二酸化炭素に回帰すると仮定して推定を行った. アマモの炭素収支は, 上記で観測したアマモ草体の生産量, 枯死量, 光合成量と呼吸量をそれぞれ算出し, それらの総和により推定を行った (図-3) .

3. 結果および考察

(1) アマモ草体の炭素含有量

栄養株, 生殖株, 種子, 地下茎に分離したアマモ草体の炭素含有量の年平均値を図-4に示した. 栄養株と地下茎は年間を通して採取できたが, 生殖株と種子については, 5~9月調査のみで採取できたためその平均値を示した. 生殖株と栄養株の炭素含有量は約33%とほぼ同等であり, 地下茎では41.2%, 種子は51.3%と, 栄養株と生殖

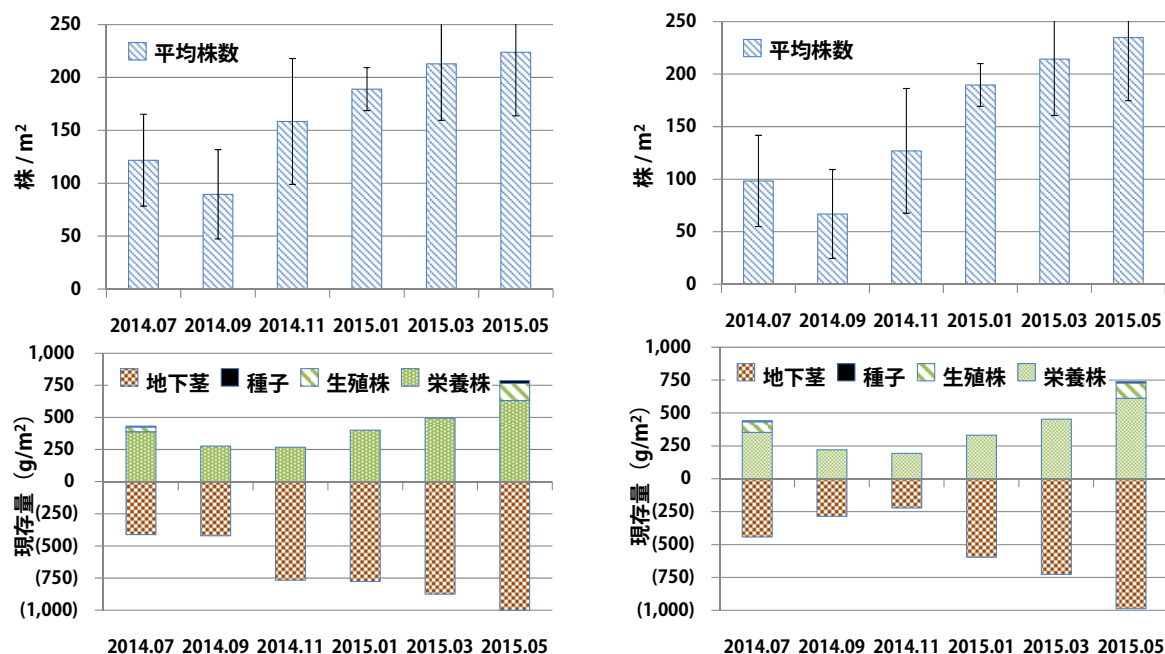


図-5 御殿場海域の造成アマモ場（左図）と松名瀬海域の天然アマモ場（右図）における、アマモ株密度（上段）とアマモ乾燥現存量（下段）の変化

株と比較して高い値となった。これは、種子や地下茎には、デンプン質が高く含まれる³⁾ことが理由として考えられた。

(2) アマモ草体の生産量と枯死量の推定

御殿場および松名瀬のアマモの現存量（乾燥重量）とそれぞれの炭素含有量から算出した草体地上部（栄養株、生殖株、種子）と地下部（地下茎）の炭素量と草体株密度の変化を図-5に示した。両海域ともに現存量及び草体株密度が最大になったのは5月であり、その現存量は御殿場海域で地上部が762g-DW、地下部が998g-DW、松名瀬海域では地上部が742g-DW、地下部が992g-DWであった。一方、両海域とも株密度が最小になったのは9月であったが、現存量が最小になったのは、御殿場海域は9月で地上部、地下部それぞれ262g-DW、358g-DW、松名瀬海域では11月で、地上部、地下部それぞれ202g-DW、240g-DWであった。以上より、御殿場と松名瀬海域の造成と天然アマモ場では、伊勢湾のアマモの繁茂期にあたる春期（3～5月）にかけて、地上部、地下部共に草体株密度と現存量が最大になり、高水温時期を越えた秋期（9～11月）に現存量が少なくなるという、周期的な増減を繰り返す。その繁茂状況は両海域でほとんど違いはないことが分かった。そこでその現存量の変化より、次式を用いて両海域におけるアマモの成長による生産量と枯死量を算出した。

$$P = \sum (W_{s_{t+1}} - W_{s_t}) \times C_s + \sum (W_{m_{t+1}} - W_{m_t}) \times C_m + \sum (W_{e_{t+1}} - W_{e_t}) \times C_e + \sum (W_{r_{t+1}} - W_{r_t}) \times C_r \quad (3)$$

$$M = \sum (W_{s_t} - W_{s_{t+1}}) \times C_s + \sum (W_{m_t} - W_{m_{t+1}}) \times C_m + \sum (W_{e_t} - W_{e_{t+1}}) \times C_e + \sum (W_{r_t} - W_{r_{t+1}}) \times C_r \quad (4)$$

ここで P はアマモ草体の生産量、 M はアマモ草体の枯死量、 C_s 、 C_m 、 C_e 、 C_r はそれぞれアマモ草体の各部位（種子、生殖株、栄養株、地下茎）の単位面積あたりの炭素含有量、 W_s 、 W_m 、 W_e 、 W_r はそれぞれアマモ各部位（種子、生殖株、栄養株、地下茎）の単位面積あたりの乾燥重量、 t は観測時期を示す。その結果、今年度の調査における御殿場および松名瀬のアマモ場の生産量は炭素換算でそれぞれ361g-C/m²/year、419g-C/m²/year、枯死量は炭素換算でそれぞれ122g-C/m²/year、168g-C/m²/yearと推算することができた（表-1）。

(3) アマモの呼吸量と光合成量の推定

2014年11月に御殿場海域のアマモ場と隣接した裸地海底に設置した明暗条件のアマモチャンパーとベンシックチャンパー内の溶存酸素濃度の変化を図-6に示した。明条件のチャンパー内の溶存酸素濃度はほぼ直線的に増加していた。これは、ベンシックチャンパー内では裸地海底の堆積物上に生息する底生微細藻類により、アマモチャンパー内ではアマモ草体と海底堆積物上の底生微細藻類により光合成が行われていることが考えられる。特にアマモ場内では、観測中に過飽和になるほどの酸素が光

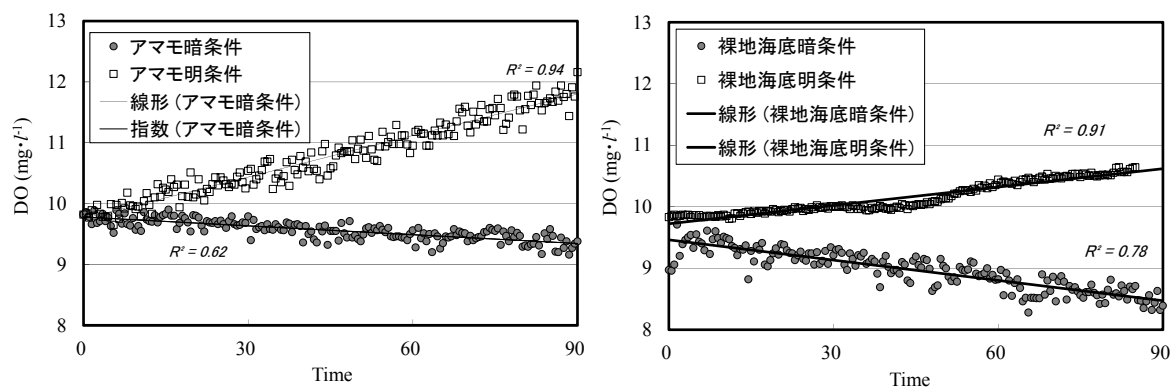


図-6 御殿場海域の造成アマモ場に設置したアマモチャンバー内の溶存酸素濃度の変化（左図）と隣接した裸地海底上に設置したベンシクチャンバー内の溶存酸素濃度の変化（右図）

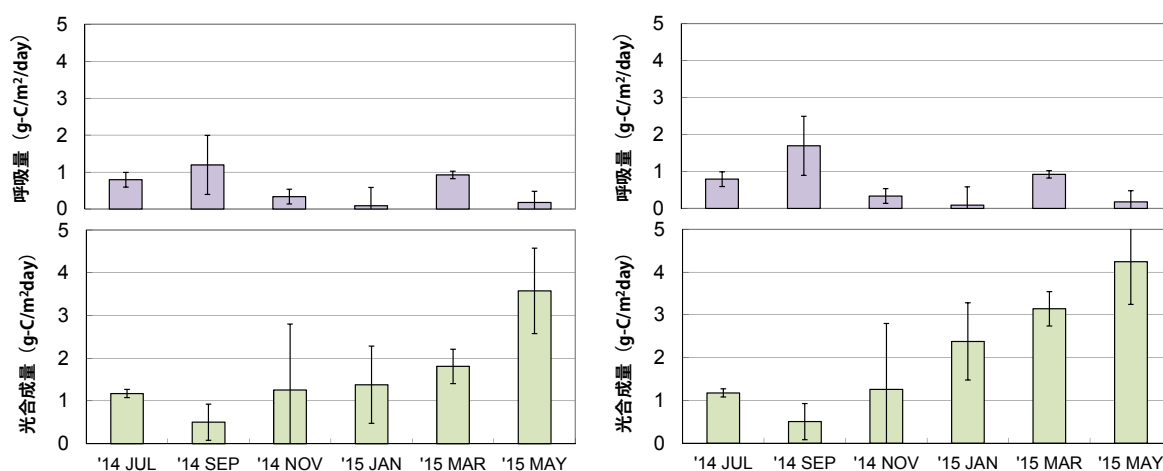


図-7 御殿場海域の造成アマモ場（左図）と松名瀬海域の天然アマモ場（右図）における呼吸速度と光合成速度の経時変化

合成により生成されていることが確認できた。一方暗条件では、各チャンバー内の溶存酸素濃度がほぼ直線的に減少することが確認できた。これはアマモ草体および海底堆積物中の底生生物やバクテリア等の呼吸により、各チャンバー内の海水中の酸素濃度が減少していることが理由として考えられた。以上のチャンバーを用いたアマモ場の溶存酸素濃度変化量から式(1)、(2)を用いてアマモの呼吸量と光合成量を算出し、図-5に示した、御殿場および松名瀬両海域のアマモの株密度で補正することにより、呼吸による炭素排出量と光合成による炭素固定量の季節変化を算出した結果を図-7に示した。御殿場海域のアマモの光合成量は、現存量と同様に増加し、繁茂期にあたる5月には $3.57\text{g-C/m}^2/\text{day}$ と最も高く、現存量の最も低くなる9月に $0.50\text{g-C/m}^2/\text{day}$ と最も少なくなった。一方同海域の呼吸量は、最も水温の高い9月に $1.12\text{g-C/m}^2/\text{day}$ と最大値を示したが、最も水温の低い1月に $0.08\text{g-C/m}^2/\text{day}$ と最小になった。通年の調査結果から、年間の呼吸量と光合成による炭素固定量を試算し、表-1に示した。御殿場と松名瀬で呼吸量はそれぞれ $262\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、 $299\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、光合成量はそれぞれ $609\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、 $647\text{g-C/m}^2/\text{year}$ となった。

ここで推定された光合成による炭素固定量と前述したアマモ草体の最大現存量から算出した炭素固定量から年間の生産量と最大現存量の比 (P/B比) を算出すると、御殿場海域の造成アマモ場で1.7、松名瀬海域の天然アマモ場で1.5となり、三陸沿岸や瀬戸内沿岸域⁴⁾における既往のアマモ場のP/B比4.0よりも低い値を示した。

(4) アマモ場における炭素収支

前述の結果から推定した図-3の概念図に示した生産量（光合成量）、枯死量および呼吸量を用いて、アマモ場における炭素固定量および排出量を算出し表-1に示した。アマモ草体の炭素固定量は前述した光合成による炭素固定量とした。一方、アマモの炭素放出量は、草体の枯死量と呼吸量の和とし、御殿場と松名瀬海域でそれぞれ、 $384\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、 $467\text{g-C/m}^2/\text{year}$ となった。また排出量である呼吸量は、枯死量と比較して約2倍であった。

以上の結果より、炭素固定量と放出量の総和から年間のアマモの炭素固定量を算出すると、御殿場と松名瀬海域でそれぞれ、 $225\text{g-C/m}^2/\text{year}$ 、 $180\text{g-C/m}^2/\text{year}$ と推算でき、

表-1 アマモ場における炭素固定量および排出量

場所	面積 (ha)	炭素固定量 (g-C/m ² /year)		炭素排出量 (g-C/m ² /year)		P/B比
		草体生産量	光合成量	草体枯死量	呼吸量	
御殿場 (造成)	2	361	609	122	262	1.7
松名瀬 (天然)	100	419	647	168	299	1.5

御殿場の造成干潟のほうが、松名瀬の天然干潟よりも高い炭素固定量であった。これは松名瀬の天然アマモ場は100haと伊勢湾内最大級のアマモ場であり、過去から長期間安定的に定着している。一方御殿場の造成アマモ場は、造成直後は0.1 haであったが、造成後10年間で約2 haに伸長し、現在も周辺部へ拡大しているアマモ場である。以上の理由により安定的な松名瀬と比較して生産量が高くなったことが理由として考えられた。

この値は、伊藤らによる⁶⁾、国内の代表的な海藻（草）場の炭素循環から算出した、長期的な炭素固定量は、アマモ場で100g-C/m²/year、アラメ・カジメ場で1670g-C/m²/year、コンブ場およびガラモ場でそれぞれ130g-C/m²/yearおよび600g-C/m²/yearと試算されている。一方陸域における森林の炭素固定量に着目してみると温帯林の純一次生産量は650g-C/m²/yearと報告されている⁷⁾。これらと比較すると、伊勢湾内のアマモ場の炭素固定量は、森林の炭素固定量の約1/3 程度、アラメ・カジメ場の約1/8程度であった。

ただし、本研究においては、枯死流出した後のアマモ草体の有機物の挙動については未調査である。Carlosらによると、アマモ場周辺域の堆積物中の同位体分析により、アマモ草体の約16%は枯死後周辺堆積物中に埋没し、長期間存在するとの報告もある⁹⁾。本研究では、枯死した草体は全て二酸化炭素に分解すると仮定しているが、難分解性の有機物量が評価できれば、さらにブルーカーボンとして炭素固定量が増加する可能性がある。今後、枯死流出したアマモ草体の分解過程を詳細に追跡する必要があると考えられた。

以上より、御殿場海域の造成アマモ場と松名瀬海域の天然アマモ場の面積がそれぞれ2ha, 100haであることから、両海域における炭素収支を算出すると、御殿場海域のアマモ場で4.5t-C/year, 松名瀬海域のアマモ場で180t-C/yearの炭素をブルーカーボンとして固定していることが分かった。

(4) アマモ場における炭素固定の貨幣価値

干潟や藻場などの機能や効果について研究がなされているが、多くは代替的な手法であり、可視化が困難である。その中でも炭素固定機能は、「二酸化炭素の排出権取引」など直接的な貨幣価値を有している。そこで、既往知見をもとに、アマモ場の炭素固定量の貨幣化を試み

た。前述の結果では、伊勢湾におけるアマモ場の炭素固定量は、御殿場と松名瀬海域でそれぞれ、225g-C/m²/year, 180g-C/m²/yearと試算することができた。この結果と「二酸化炭素排出量取引の取引価格」を用いて炭素固定効果を試算した。

二酸化炭素の排出権取引価格は、自主参加型国内排出量取引制度（JVETS）の2010年の実績結果で日本国内では平均610 円/ t-CO₂となっている⁸⁾。よって1 haのアマモ場を造成した場合、国内の排出権価格で約4500円/ha/yearの価値が創出されたと考えられた。減価償却資産の耐用年数等に関する省令⁹⁾（平成10年12月24 日大蔵省令第175号）ではアマモ場造成に関連する覆砂事業の耐用年数が、10年と定められていることから、アマモ場造成の炭素固定による大気保全効果額は、約45,000円/haと推算できた。

4. 結論

本研究では、伊勢湾御殿場海域に造成されたアマモ場と松名瀬海域の天然アマモ場において、アマモ草体の炭素固定量を推定し、その効果の貨幣価値化を試みた。主な結論を以下に示す。

- 1) アマモ草体の栄養株、生殖株、種子、地下茎に分離した炭素現存量を算出した結果、それぞれ、33.0, 32.7, 41.2, 51.3%であった。また、現存量の変化より、アマモの成長による生産量と枯死量を算出した結果、御殿場および松名瀬のアマモ場の生産量は炭素換算でそれぞれ361g-C/m²/year, 419g-C/m²/year, 枯死量は炭素換算でそれぞれ122g-C/m²/year, 168g-C/m²/yearと推算することができた。
- 2) アマモ場と隣接した裸地海底に設置した明暗条件のチャンバーを用いてアマモの光合成量と呼吸量を算出した結果、御殿場と松名瀬で呼吸量はそれぞれ262g-C/m²/year, 299g-C/m²/year, 光合成量はそれぞれ609g-C/m²/year, 647g-C/m²/yearとなった。ここで推定された光合成による炭素固定量と前述したアマモ草体の最大現存量から算出した炭素固定量からP/B比を算出すると、御殿場海域の造成アマモ場で1.7, 松名瀬海域の天然アマモ場で1.5となった。
- 3) 生産量（光合成量）、枯死量および呼吸量の総和から年間のアマモの炭素固定量を推定すると、御殿場と松名瀬海域でそれぞれ、225g-C/m²/year, 180g-C/m²/yearと

推算でき、御殿場の造成干潟のほうが、松名瀬の天然干潟よりも高い炭素固定量であった。両海域アマモ場全域における炭素収支を算出すると、御殿場海域で4.5t-C/year、松名瀬海域で180t-C/yearの炭素をブルーカーボンとして固定していることが分かった。ただし、本研究においては、枯死流出した後のアマモ草体の有機物の挙動については未調査であるため、今後、枯死流出したアマモ草体の分解過程を詳細に追跡することにより、さらにブルーカーボンとして炭素固定量が増加する可能性が示唆された。

- 4) 公共事業におけるアマモ場造成による大気保全効果を考慮した場合、1ha あた10年間で約45,000円の便益を向上させられると考えられた。

謝辞：本研究は、環境省総合推進費事業、「二次的自然「里海」の短寿命生態系におけるブルーカーボン評価に関する研究」の中で実施された。現地実験にあたり、三重県農林水産部水産基盤整備課および松阪漁業協同組合、有限会社鈴木ダイビングサービスから多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Ed.) (2009): Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRIDArendal. pp.1-78.
- 2) 理科年表 2010 年版 (2009) : 自然科学研究機構国立天文台編, 丸善株式会社, pp.1041.
- 3) 新崎盛畝 (1949) : アマモ・コアマモの生態, 日本水産学会誌, 第 16 巻, 第 2 号, pp.70-76.
- 4) 平成 25 年度地球温暖化対策推進費委託事業「藻場・干潟の炭素吸収資源評価と吸収機能向上技術の開発」報告書 (2014) : 独立行政法人水産総合研究センター・瀬戸内海区水産研究所, pp.71-90
- 5) Carlos M. Duarte and Just Cebrian (1996) : The fate of marine autotrophic production, *Limnol. Oceanogr.*, 41(8), pp. 1758-1766.
- 6) 伊藤 靖・中野喜央・松下 訓・三上信雄・横山 純・桐原慎二・能登谷正浩 (2009) : 藻場による炭素固定量の試算, *水産工学*, 46, pp.135-146.
- 7) 大谷義和 (2001) : 二酸化炭素フラックス, *森林科学*, 33, pp.10-17.
- 8) 環境省 報道発表資料 (2010) : <http://www.env.go.jp/press/16213.html>.
- 9) 減価償却資産の耐用年数等に関する省令 (2014) : 大蔵省.

(2015.3.18 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON CARBON STORAGE BY *ZOSTERA MARINA* IN ISE BAY

Hideki KOKUBU and Hirokatsu YAMADA

The carbon captured by living organisms in coastal area which called “Blue Carbon” is stored in the form of sediments from mangroves, salt marshes and seagrasses. In this study, the blue carbon sinks by *Zostera marina* were evaluated in artificial (Gotenba) and natural (Matsunase) *Zostera* beds in Ise Bay. Photosynthesis and oxygen consumption of *Zostera marina* were observed by using chamber with light and dark conditions. It is estimated that the amount of carbon storage as blue carbon was 225g-C/m²/year and 180g-C/m²/year in the artificial and natural *Zostera marina* beds respectively. These results indicated that the *Zostera marina* plays a role for contribution to sink the blue carbon.